

ارزیابی روش‌های مختلف تعیین تنش برشی بستر در پیچ تند کانال با توپوگرافی توسعه‌یافته

جواد مظفری^{۱*}، ابراهیم امیری تکلدانی^۲، مهدی خادمی^۳

۱- استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه اراک

۲- استادیار گروه آبیاری دانشگاه تهران

۳- دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، پردیس کشاورزی، دانشگاه تهران

* اراک، صندوق پستی ۸۷۹

Javad_370@yahoo.com

چکیده- تنش‌برشی بستر یکی از پارامترهای مهم در بررسی جریان رودخانه‌ها بوده و نقش مهمی در تعیین الگو و میزان فرسایش و انتقال رسوب دارد. در نتیجه، تعیین مقدار آن در نقاط مختلف میدان جریان، به‌ویژه در مجاورت بستر و دیوارهای ساحلی اهمیت به‌سزایی دارد. علی‌رغم مطالعات گسترده در باره مقدار و نحوه توزیع تنش‌برشی بستر در مجاری مستقیم و نیز در پیچ رودخانه‌ها، به‌دلیل پیچیدگی‌های پیچ رودخانه، انجام تحقیقات بیشتری در این زمینه ضروری به‌نظر می‌رسد. در این مقاله، به بررسی روش‌های مختلف تعیین تنش‌برشی بستر با استفاده از سرعت‌های متوسط و لحظه‌ای به‌دست آمده با دستگاه ADVP، پرداخته شده است. این روش‌ها که مهم‌ترین آنها روش تنش‌برشی رینولدز، روش انرژی جنبشی آشفتگی و روش پروفیل لگاریتمی سرعت است، تاکنون در پیچ تند کانال، مقایسه نشده‌اند. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده روی کانال آزمایشگاهی قوسی شکل با زاویه مرکزی برابر ۱۹۳ درجه با توپوگرافی توسعه‌یافته، نشان می‌دهد که جریان سه‌بعدی قوی، الگوهای تنش‌های رینولدز را نسبت به الگوهای موجود در کانال مستقیم، کاملاً تغییر می‌دهد، به‌طوری‌که این الگوها نظم مشخصی را برای تعیین صحیح تنش‌برشی بستر نشان نمی‌دهند. از سوی دیگر، پروفیل‌های سرعت طولی، به‌دلیل تاثیر سلول‌های جریان ثانویه، یکنواخت‌تر از پروفیل لگاریتمی سرعت بوده و در نتیجه استفاده از روش لگاریتمی نیز تا حدودی دارای عدم اطمینان می‌باشد. به هر حال نتایج نشان می‌دهد که روش لگاریتمی برای تعیین تنش‌برشی بستر، جواب‌های مناسب‌تری را نسبت به دیگر روش‌های مورد بررسی در این تحقیق ارائه می‌دهد.

کلیدواژگان: تنش‌برشی بستر، تنش رینولدز، توزیع لگاریتمی سرعت، انرژی جنبشی آشفتگی، پیچ تند.

۱- مقدمه

پیچ‌های رودخانه بخش مهمی از رودخانه را تشکیل داده و با گذر زمان تغییرات وسیعی در آنها ایجاد می‌شود. بوزینسک^۱ (۱۸۶۸) و تامسون^۲ (۱۸۷۶) نخستین بار پیچ رودخانه را مطالعه کردند (روزوفسکی^۳، ۱۹۵۷). در زمینه مدل‌های جریان، جانسن و پارکر^۴ (۱۹۸۹) رابطه‌ای را برای سرعت طولی پیشنهاد کردند. بریج^۵ (۱۹۹۲) برای سرعت طولی در جریان ماندگار رابطه‌ای را ارائه کرد. در مدل‌سازی‌های سه‌بعدی جریان، منصوری (۱۳۸۵)، به شبیه‌سازی عددی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰ درجه پرداخت. همچنین وو^۶ و همکاران (۲۰۰۰)، روتر و السن^۷ (۲۰۰۵)، زنگ و همکاران^{۱۲} (۲۰۰۸) و خسرونژاد و همکاران (۲۰۰۸) در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی جریان تحقیقاتی را انجام دادند.

از سوی دیگر مطالعات آزمایشگاهی قابل توجهی در باره خم‌ها انجام شده است. زیمرمن^۸ (۱۹۷۷) رابطه‌ای را برای زاویه بین تنش‌برشی جریان اصلی و تنش‌برشی عرضی و زبری در پیچ ارائه کرد. دوریند^۹ (۱۹۷۷) با استفاده از توزیع لگاریتمی سرعت برای سرعت جریان اصلی، توزیع عمقی سرعت جریان ثانویه را برای آبراهه‌های انحادار کم‌عمق به‌دست آورد. چودری و نارسیمهان^{۱۰} (۱۹۷۷) ویژگیهای حرکت چرخشی و تنش‌برشی بستر را بررسی و بیان کردند که حداکثر تنش‌برشی بستر در جدار خارجی، در ۹۰ درجه به‌دست می‌آید و در آبراهه باریک، رشد جریان چرخشی سریعتر بوده و قدرت آن بیشتر از

آبراهه پهن است. ادگارد و برگز^{۱۱} (۱۹۸۸) به مطالعه جریان در کانال ۱۸۰ درجه با توپوگرافی کف طبیعی ماسه‌ای و سواحل شیبدار ثابت پرداخته و اظهار کردند که هسته دارای بیشینه سرعت، به سمت ساحل خارجی حرکت کرده و در حدود ۹۰ درجه به ساحل خارجی می‌رسد. بلانکارت و گراف^{۱۲} (۲۰۰۲) در کانال با کف افقی ماسه‌ای و سواحل عمودی ۱۲۰ درجه، جریان آشفته و زبر را بررسی کرده و سلول ساحل خارجی جریان ثانویه را که حرکتی در خلاف سلول اصلی جریان ثانویه دارد مشاهده کردند. دوآرت^{۱۳} (۲۰۰۸) آزمایشهایی را برای بررسی تاثیر زبری ساحل خارجی بر الگوی جریان در کانال مستطیلی با پیچ ۱۹۳ درجه انجام داد و چنین بیان کرد که با افزایش زبری، سلول عرضی ساحل خارجی پهن‌تر و قوی‌تر می‌شود. ون بالن^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۰) با مقایسه روش‌های RANS^{۱۵} و LES^{۱۶} با داده‌های آزمایشگاهی در فلومی با پیچ تند ۱۹۳ درجه، بیان کردند که مدل RANS دارای پیش‌بینی بالایی برای تنش‌برشی بستر نسبت به مدل LES است.

در زمینه اندازه‌گیری و تخمین تنش‌برشی، روش‌های متعددی ارائه شده است. معمول‌ترین روش برای تخمین تنش‌برشی در رودخانه‌ها، استفاده از تنش‌برشی متوسط گیری شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود (شلیختین^{۱۷}، ۱۹۸۷):

$$\tau_0 = \rho g R S_f \quad (1)$$

در این رابطه τ_0 تنش‌برشی کل، ρ چگالی آب، g شتاب ثقل، R شعاع هیدرولیکی مقطع کانال و S_f شیب

1. Boussinesq
2. Thomson
3. Rosovskii
4. Johnson & Parker
5. Bridge
6. Wu et al
7. Ruther and Olsen
- 12 Zeng et al
8. Zimmerman
9. De Vriend
10. Choudary & Narasimhan

11. Odgaard & Bergs
12. Blanckaert & Graf
13. Duarte
14. Van Balen et al.
15. Reynolds-averaged Navier-Stokes
16. Large eddy simulation
17. Schiliciting

نیز نبود دقت کافی، این روش تا سال‌های اخیر به‌طور گسترده‌ای استفاده نمی‌شد. توسعه وسایل اندازه‌گیری مانند ADV^۳، اندازه‌گیری نوسانهای سرعت را در سه بعد در فرکانس‌های بالا با خطای کم امکان‌پذیر ساخته است. این روش نسبتاً حساس بوده و برای استفاده از این روش می‌توان به دو روش عمل کرد. در روش اول هنگامی‌که پروفیل آشفتگی اندازه‌گیری می‌شود، تنش برشی کف از برونیابی توزیع عمودی تنش برشی رینولدز به‌دست می‌آید. در روش دوم از اندازه‌گیری‌های نقطه‌ای استفاده می‌شود، بدین معنا که یک نقطه در نزدیکی کف در نظر گرفته شده و مقادیر نوسانهای سرعت طولی و عمودی در آن نقطه به‌دست آمده و سپس تنش برشی بستر از روی آنها محاسبه می‌شود. به‌دلیل آن که معمولاً دستگاه ADV توانایی اندازه‌گیری صحیح سرعت در نزدیکی کف و محدوده قابل ذکر را ندارد، نقطه مورد اندازه‌گیری نباید پایین‌تر از ۱۰ درصد عمق جریان باشد (پاسکال^۴، ۲۰۰۴).

روش انرژی جنبشی آشفتگی TKE^۵ نیز روش دیگری است که با استفاده از سه جزء سرعت به‌دست می‌آید (کیم^۶ و همکاران، ۲۰۰۰):

$$\tau_0 = C_1 \left[0.5 \rho (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \right] \quad (5)$$

که در آن C_1 ضریبی تقریباً ثابت برابر ۰/۱۹ است. کیم و همکاران (۲۰۰۰) روش اصلاح شده‌ای را که در آن فقط از نوسانهای عمودی سرعت استفاده می‌شود، پیشنهاد کردند. مزیت این روش آن است که خطای مربوط به نویز دستگاه اندازه‌گیری ADV برای نوسانهای عمودی کمتر از نوسانهای افقی است. در این روش:

$$\tau_0 = C_2 \rho \overline{w'^2} \quad (6)$$

خط انرژی است. تنش برشی موضعی از رابطه لگاریتمی بین سرعت و سرعت برشی به‌دست می‌آید (شیلیختین، ۱۹۸۷):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{Z_0} \right) \quad (2)$$

در این رابطه Z ارتفاع بالای کف و Z_0 مشخصه طول زبری، u سرعت در ارتفاع Z ، u_* سرعت برشی و κ ضریب فن‌کارمن تقریباً برابر ۰/۴۱ است. این روش به‌طور وسیعی استفاده می‌شود، اما مقداری عدم قطعیت دارد. از جمله این که فقط بخشی از پروفیل سرعت لگاریتمی بوده و مشخصه طول زبری نیز با عدم قطعیت قابل توجهی پیش‌بینی می‌شود که تأثیر بالایی بر تخمین تنش برشی بستر خواهد داشت. همچنین در خم، پروفیل سرعت - به‌علت نیروی گریز از مرکز قوی- با پروفیل سرعت در کانال مستقیم تفاوت دارد.

روش دیگر برای تخمین تنش برشی، استفاده از قانون مربع تنش^۱ است که تنش برشی متوسط در کف را به مربع سرعت مرتبط می‌سازد (شیلیختین، ۱۹۸۷):

$$\tau_0 = \rho C_d U^2 \quad (3)$$

در این رابطه C_d ضریب دراگ و U سرعت متوسط است. مشکل اصلی در این روش آن است که ضریب دراگ ثابت نبوده و تخمین دقیق مقدار آن مشکل است.

در صورتی که اندازه‌گیری‌های آشفتگی در دست باشد، تنش برشی موضعی می‌تواند از تنش رینولدز تعیین شود (نزو و ناکاگاوا^۲، ۱۹۹۳):

$$\tau_0 = -\rho \overline{u'w'} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، u' و w' به‌ترتیب نوسانهای سرعت‌های طولی و عمودی است. به‌دلیل دشواری در اندازه‌گیری و

3 Acoustic Doppler Velocimeter

4. Pascal et al.

5. Turbulent Kinematic Energy

6. Kim et al.

1. Quadratic stress law

2. Nezu & Nakagawa

که C_2 برابر ۰/۹ است.

مطالعات بسیاری بر روی اندازه‌گیری و تعیین تنش برشی بستر انجام شده که بیشتر آنها برای کانال‌های مستقیم است. قوش^۱ (۱۹۷۰)، تنش برشی بستر را در کانال ذوزنقه‌ای مستقیم به وسیله لوله پرستون اندازه‌گیری کرد. نایت^۲ و همکاران (۱۹۸۴)، به بررسی تنش برشی بستر در کانال‌های مستقیم مستطیلی پرداختند. محمدی و نایت (۲۰۰۴)، به بررسی توزیع تنش برشی بستر در کانال مستقیم V شکل پرداخته و برای تنش برشی متوسط بر روی دیواره و کف روابطی را ارائه کردند. پاسکال و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی روش‌های مختلف تعیین تنش برشی بستر با اندازه‌گیری جریان به وسیله ADV در کانال مستقیم پرداختند و نتیجه‌گیری کردند که روش لگاریتمی تخمین بالایی از تنش برشی بستر را نسبت به سایر روش‌ها به دست می‌دهد و تعیین تنش برشی بستر از تنش رینولدز مناسب‌ترین روش به نظر می‌رسد. همچنین تعیین تنش برشی بستر از پروفیل لگاریتمی دارای تخمین بیش از دیگر روش‌ها است. زراتی و همکاران (۲۰۰۸)، مدلی نیمه تحلیلی را برای توزیع تنش برشی بستر در کانال مستقیم ارائه کردند. باقری و لمین^۳ (۲۰۰۸) به تخمین تنش برشی بستر در کانال مستقیم با استفاده از ADV^۴ و Hot-film در کانال با بستر شنی پرداختند و نتیجه‌گیری کردند که روش تنش رینولدز نتایج مناسبی را ارائه می‌دهد. همچنین نتیجه‌گیری کردند که روش TKE دارای تخمین کمتری بوده و روش لگاریتمی دارای تخمین بالایی است. به هر حال در آزمایش مذکور کانال مورد آزمایش مستقیم بوده و جریان عرضی قدرتمندی شبیه به جریان

در خم وجود نداشته است. الگوی جریان در کانال مستقیم با توجه به ضعیف بودن جریان عرضی با مشخصات جریان سه‌بعدی در پیچ متفاوت خواهد بود. با توجه به اینکه اندازه‌گیری تنش برشی بستر در پیچ‌ها مورد توجه اندکی بوده است، ضروری به نظر می‌رسد که روش‌های مورد استفاده در کانال مستقیم مطالعه و بهترین روش برای استفاده در پیچ تعیین شود. هدف از این تحقیق، بررسی روش‌های تعیین تنش برشی بستر در پیچ کانال و انتخاب بهترین روش برای اندازه‌گیری تنش برشی بستر در پیچ است تا بتوان از آن برای ارتباط دادن بین الگوی جریان و فرسایش استفاده کرد.

۲- مواد و روش‌ها

آزمایشها در کانال آزمایشگاه دانشگاه EPFL در کشور سوئیس انجام شد. این کانال با کف افقی، دارای عرض ۱/۳ متر و پیچ ۱۹۳ درجه است. شکل ۱ طرحی از کانال را نشان می‌دهد. جریان از مخزن به حوضچه ورودی کانال به طول ۲ متر وارد شده و با گذر از بخش مستقیم کانال به طول ۹ متر -که هدف از ساخت آن ایجاد جریان توسعه یافته می‌باشد- به پیچ ثابتی به عمق ۰/۸۵ متر و شعاع انحنای ۱/۷ متر می‌رسد که دارای طول ۵/۷۳ متر در خط مرکزی است. در پلان بخش مستقیمی به طول ۳ متر در پایین دست پیچ، جریان را به حوضچه ته‌نشینی رسوب و سپس به حوضچه خروجی هدایت می‌کند.

برای اندازه‌گیری سرعت از دستگاه ADV^۵ استفاده شد (شکل ۲). این دستگاه دارای انتشاردهنده مرکزی^۶ و چهار چهار گیرنده^۶ است که در درون جعبه‌ای پر از آب قرار گرفته و بر روی بازویی حمل کننده قرار گرفته است.

1. Ghosh

2. Knight

3. Bagheri & Lemin

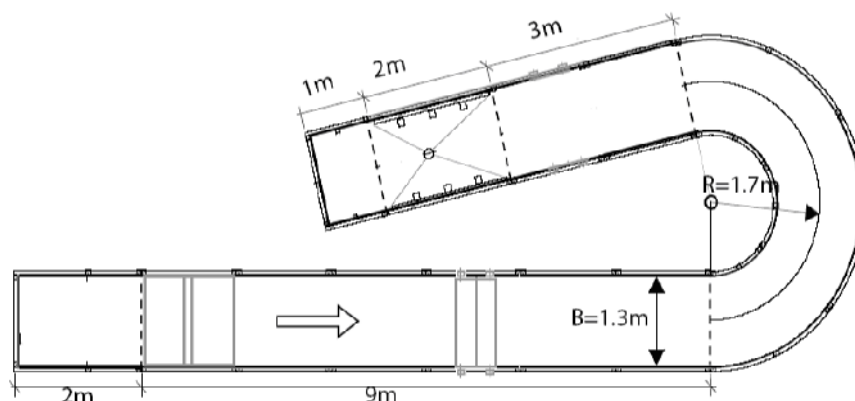
4. Acoustic Doppler Velocimeter Profiler

5. Central emitter

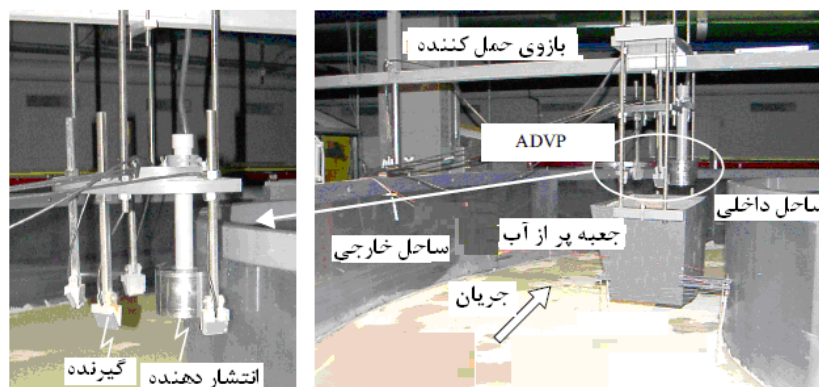
6. Reciever

سرعت انجام شد. به وسیله این دستگاه سرعت‌های لحظه‌ای $\vec{v}(t) = (u, v, w)(t)$ اندازه‌گیری می‌شود که با استفاده از آن‌ها می‌توان سرعت‌های متوسط و تنش‌های رینولدز را تعیین کرد. اندازه‌گیری سرعت در درون پیچ در ۱۶ مقطع عرضی ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۰، ۸۰، ۹۰، ۱۰۰، ۱۱۰، ۱۲۰، ۱۳۵، ۱۵۰، ۱۶۵، ۱۸۰ و ۱۹۳ درجه، در بخش مستقیم بالادست در ۰/۵ و ۲/۵ متر از ابتدای خم و در بخش مستقیم پایین‌دست در ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ متر از انتهای خم انجام شد.

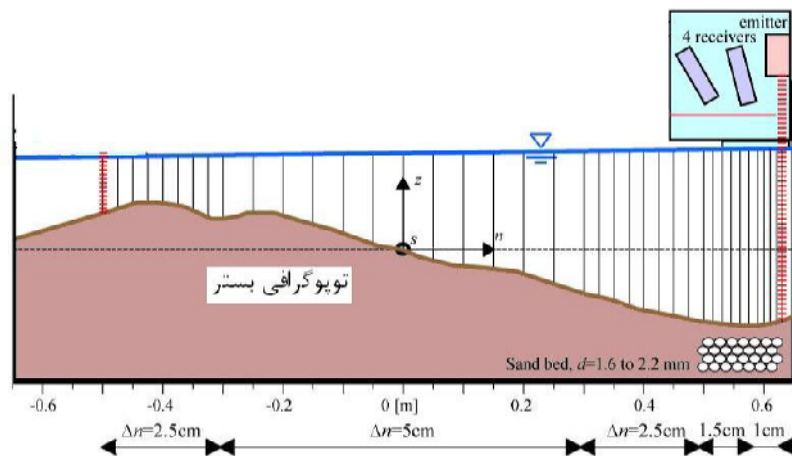
دستگاه ADV عملکردی شبیه به ADV داشته و مزیت خاصی نسبت به آن ندارد، با این تفاوت که دستگاه ADV به صورت نقطه‌ای سرعت را برداشت می‌کند و باید برای برداشت پروفیل سرعت، در عمق حرکت داده شود، اما دستگاه ADV در سطح آب قرار می‌گیرد و در هر بار اندازه‌گیری، پروفیل سرعت را در ستون عمودی آب برداشت می‌کند. به وسیله بازوی حمل‌کننده جریان (شکل ۲)، دستگاه می‌تواند در عرض و در طول کانال حرکت کرده و در مکان مورد نظر قرار بگیرد. اندازه‌گیری‌ها با فرکانس ۳۱/۲۵ Hz و در حدود ۱۸۰ ثانیه برای هر پروفیل



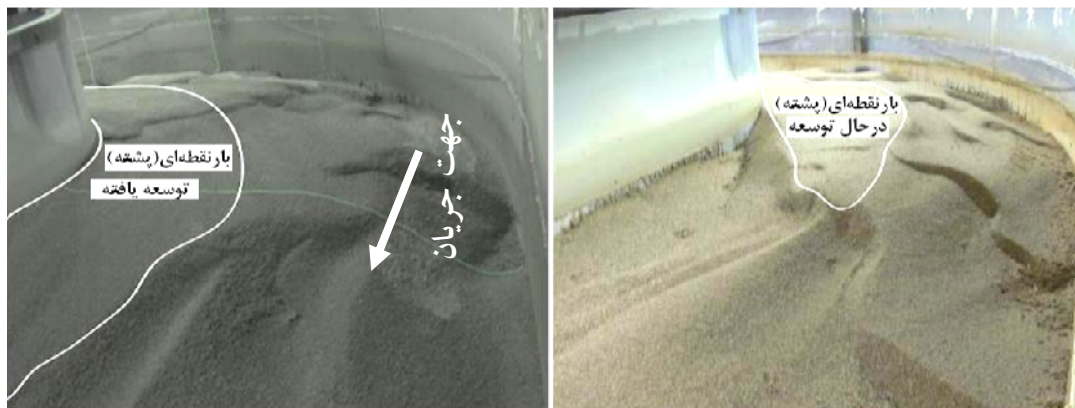
شکل ۱ طرحی از کانال آزمایشها



شکل ۲ دستگاه اندازه‌گیری ADVP



شکل ۳ شبکه اندازه‌گیری در مقاطع عرضی



شکل ۴ توسعه بار نقطه‌ای (پیش از توسعه و پس از توسعه کامل)

رسوبهای ورودی و خروجی تعادل برقرار می‌شود، بار نقطه‌ای در بخش ساحل داخلی کاملاً گسترش یابد. شکل ۴ بار نقطه‌ای را در دو حالت: در حال گسترش و گسترش یافته نشان می‌دهد. پس از به تعادل رسیدن بستر، بار نقطه‌ای تثبیت شده است. دیون‌ها از نظر تعداد ثابت مانده، اما از نظر مکان، جایگاه ثابتی نداشته و در حرکت بودند، به‌طوری‌که پس از گذشت حدود ۱۵ دقیقه، همان الگوی قبلی تکرار می‌شد.

با توجه به تغییرات سریع جایگاه دیون‌ها، امکان اندازه‌گیری با کف متحرک وجود نداشته و در نتیجه،

شبکه اندازه‌گیری در مقاطع عرضی در شکل ۳ نشان داده است. در این شکل، Δn فاصله عرضی بین مکان‌های اندازه‌گیری شده است.

برای انجام آزمایشها، پس از آماده‌سازی کانال و ایجاد سطح افقی با رسوبها، دبی ۶۳ لیتر بر ثانیه در کانال برقرار شد. رسوبها به‌وسیله تغذیه‌کننده رسوب^۱ از بالادست به کانال وارد شده و پس از انتقال به پایین‌دست، به‌وسیله جریان در حوضچه ترسیب ریخته شده و به صورت دستی جمع‌آوری می‌شد. جریان به مدت ۳ هفته ادامه داشت تا کف به وضعیت تعادل برسد و علاوه بر اینکه بین

1. Feeder

مرکزی سرعت در ورودی پیچ در مرکز مقطع عرضی قرار نگیرد. شش دیون در داخل پیچ دیده می‌شود. عمیق‌ترین بخش در مقطع عرضی ۷۰ درجه بوده و همان حوضچه^۴ است. در همان مقطع عرضی، بیشترین ارتفاع بارنقطه‌ای قابل مشاهده است. این شکل، توپوگرافی نمونه دارای حوضچه و بارنقطه‌ای را نشان می‌دهد.

در این پیچ تند، بیشینه عمق جریان در حدود ۳/۵ برابر عمق متوسط جریان در کانال است. یک بار نقطه‌ای در نیمه داخلی مقطع عرضی و یک حوضچه در ساحل خارجی توسعه یافته است. حوضچه در حدود نیمی از عرض را در مقطع ۷۰ درجه پوشش می‌دهد. شیب عرضی در این مقطع در حدود ۳۱ درجه بوده و مقدار بیشینه آن از زاویه تعادل رسوب بیشتر است که نشان‌دهنده وجود نوعی نیروی عرضی قوی رو به سمت ساحل داخلی است. پایین‌دست مقطع عرضی ۹۰ درجه، شیب عرضی بستر تغییرات کمتری را در عرض نشان می‌دهد و شکل مقاطع عرضی تقریباً خطی می‌شود.

۳-۱- اندازه‌گیری تنش‌برشی بستر

یکی از روش‌های اندازه‌گیری تنش‌برشی بستر، استفاده از تنش‌های برشی رینولدز است. در کانال‌های مستقیم، تنش‌برشی رینولدز از سطح آب به سمت بستر جریان افزایش و در نزدیکی بستر کاهش می‌یابد. پاسکال (۲۰۰۴) نشان داد که این روش یکی از بهترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تنش‌برشی بستر است. شکل ۶ یکی از آزمایش‌های وی را نشان می‌دهد که با برونمایی از نقطه بیشینه تنش رینولدز تا بستر، میزان تنش‌برشی بستر تعیین می‌شود. شکل‌هایی شبیه به شکل ۶، در آزمایش‌ها باقری ولمین (۲۰۰۸) به دست آمد که نشان‌دهنده افزایش تنش‌برشی رینولدز از سطح آب تا نزدیکی کف است.

رسوب‌های بستر با موادی به نام داکفیل^۱ منجمد شد تا بتوان اندازه‌گیری‌ها را انجام داد. این ماده با آب مخلوط شده و بر روی بستر پاشیده می‌شود. یک هفته برای خشک شدن آن زمان لازم است و اثری بر زبری نمی‌گذارد به‌طوری‌که دانه‌های رسوب، به‌خوبی مشاهده می‌شود.

برای اندازه‌گیری توپوگرافی کف، از دستگاه لیزری اندازه‌گیری فاصله استفاده شده و ارتفاع توپوگرافی از لبه بالایی کانال اندازه‌گیری شد. برای این کار در طول کانال، در بخش مستقیم بالادست در هر ۲۵ سانتی‌متر و در پایین‌دست در هر ۱۰ سانتی‌متر و در پیچ در هر ۱۰ درجه اندازه‌گیری‌ها انجام شد. در مقاطع عرضی به فواصل ۵ سانتی‌متر اندازه‌گیری انجام شد. همچنین سطح آب به‌وسیله دستگاه اندازه‌گیر نقطه‌ای^۲ در همان فواصل و در مقاطع عرضی نیز در ۸ نقطه اندازه‌گیری شد. در جدول ۱ مشخصات جریان در شرایط تعادل کف کانال ارائه شده که Q بده مورد استفاده، H عمق متوسط جریان در کانال، R_c شعاع انحنا خط مرکزی کانال، R_e عدد رینولدز، U سرعت متوسط و B عرض کانال است. دبی قبل از انجماد بستر، همان دبی مورد استفاده پس از انجماد است که در جدول ۱ آورده شده است.

۳- نتایج و بحث

همان‌طور که گفته شد توپوگرافی بستر با دستگاه لیزری اندازه‌گیری ارتفاع و تغییرات سطح آب با اشل نقطه‌ای اندازه‌گیری شد. در شکل ۵ توپوگرافی بستر نشان داده شده است. در این شکل، دیون‌ها^۳ در ساحل خارجی پیچ قابل مشاهده است. در بخش ورودی پیچ، به‌دلیل توزیع غیریکنواخت رسوبها از تغذیه‌کننده رسوب، بخش داخلی مقطع عرضی عمیق‌تر بوده و سبب می‌شود که هسته

1 Dakfill

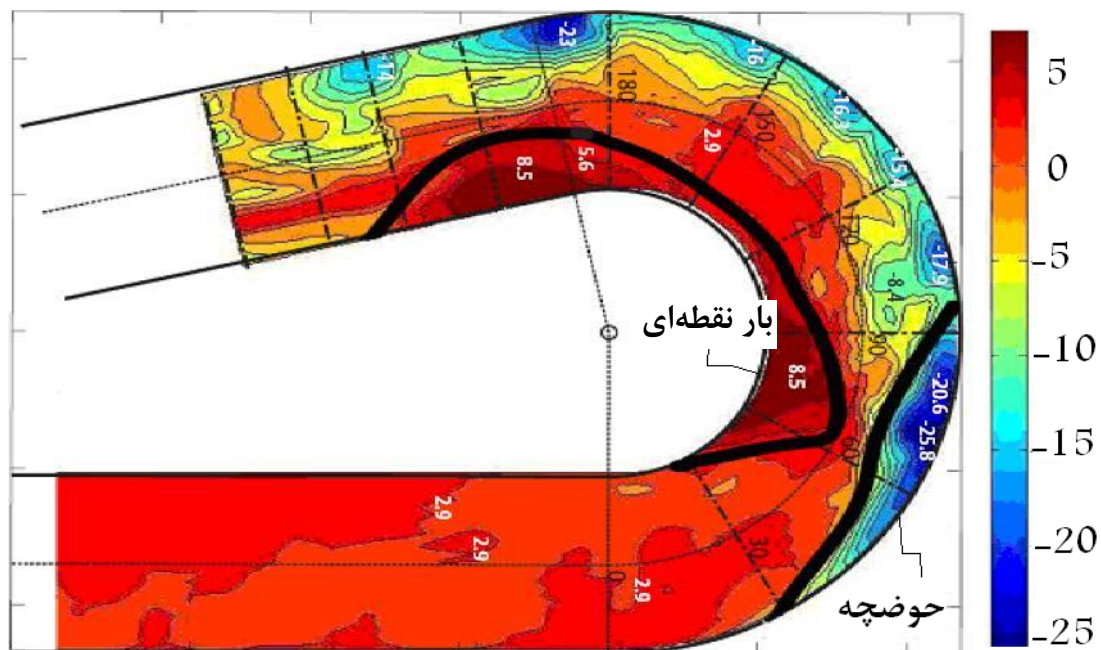
2. point gauge

3. Dunes

4. pool

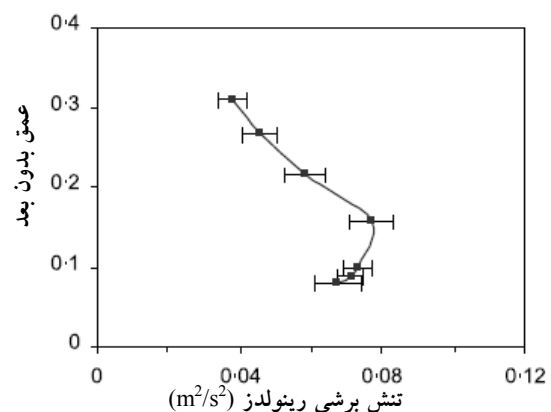
جدول ۱ مشخصات جریان

$Q[\text{ls}^{-1}]$	$H[\text{m}]$	$U[\text{ms}^{-1}]$	$u_*[\text{ms}^{-1}]$	S_f	Re	Fr	R_c/B	R_c/H	B/H
۶۳	۰/۰۹۸	۰/۴۹	۰/۰۵۶	۰/۰۰۴	۴۳۰۰۰	۰/۵	۱/۳۱	۱۷	۱۳



شکل ۵ توپوگرافی توسعه یافته برای جریان ۶۳ لیتر بر ثانیه

البته در نزدیکی بستر در حدود ۱۰ درصد پایین عمق، دستگاه‌های ADV اندازه‌گیری صحیحی ندارند و در حالی که باید افزایش را در تنش برشی رینولدز نشان دهند، کاهش نشان داده یا دچار بی‌نظمی می‌شوند. شکل ۷ دو نمونه از پروفیل‌های تنش برشی رینولدز $-\overline{u'w'}$ را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود، شکل ۷-الف، به طور کامل روند کاهشی را به سمت کف نشان می‌دهد و کاملاً متفاوت با روند افزایشی الگوی تنش رینولدز در جریان دو بعدی است. شکل ۷-ب، در آغاز روند افزایشی به سمت کف را تا حدود ۰/۷ عمق نشان می‌دهد و سپس روندی کاهشی را به سمت کف نشان می‌دهد. شکل ۸

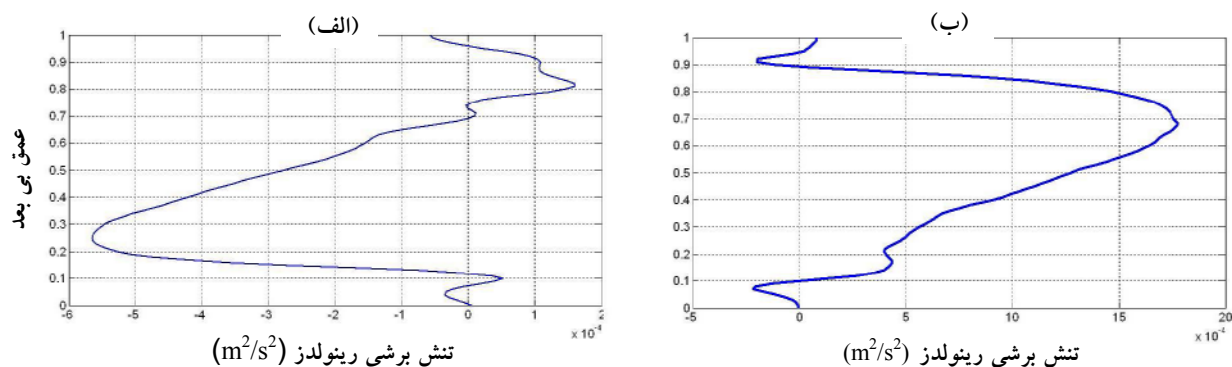


شکل ۶ تغییرات تنش برشی رینولدز در یکی از آزمایش‌های پاسکال (پاسکال ۲۰۰۴)

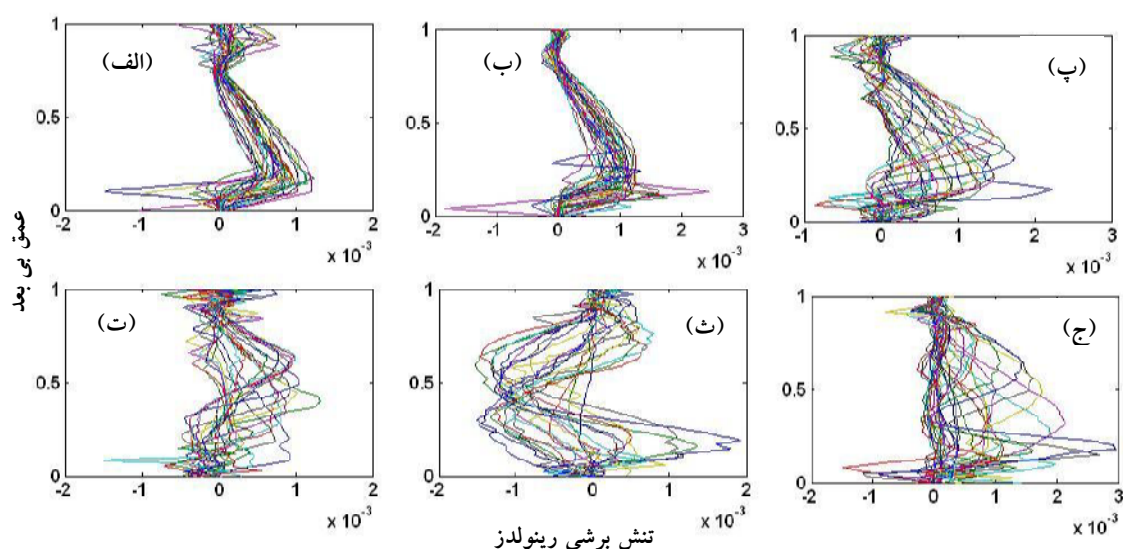
استفاده از آن برای تعیین تنش برشی بستر وجود خواهد داشت.

شکل ۸-ب (مقطع ۳۰ درجه) نیز نشان می‌دهد که هنوز الگوی تنش برشی رینولدز به سمت کف دارای نظم مشخصی بوده و افزایش می‌یابد. پروفیل‌های تنش برشی رینولدز در مقطع ۴۵ درجه نظم خود را تا حدودی از دست می‌دهند، که این نشان‌دهنده تأثیر جریان سه‌بعدی قوی در این مقطع بر تنش رینولدز است.

پروفیل‌های $\overline{u'w'}$ را در مقاطع عرضی ۰، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ درجه نشان می‌دهد. در شکل ۸-الف (مقطع صفر درجه)، مشاهده می‌شود که با توجه به اینکه جریان در ورودی خم بوده و هنوز تحت تأثیر خم قرار نگرفته است، پروفیل‌های تنش رینولدز الگوی بسیار منظمی برای تعیین تنش برشی بستر دارند و با افزایش به سمت کف، در نزدیکی کف شروع به کاهش می‌کنند. بنابراین، امکان



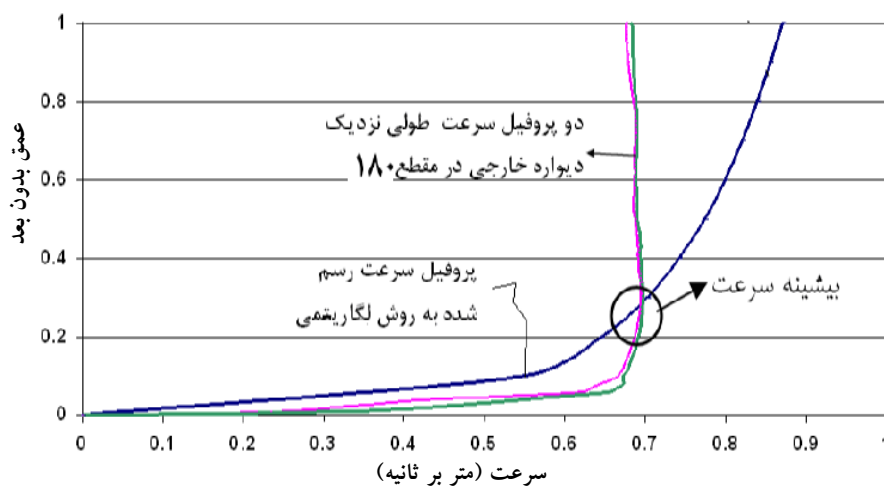
شکل ۷ دو نمونه پروفیل تنش برشی رینولدز $\overline{u'w'}$: الف- مقطع عرضی ۹۰ درجه و ب- مقطع عرضی ۱۲۰ درجه



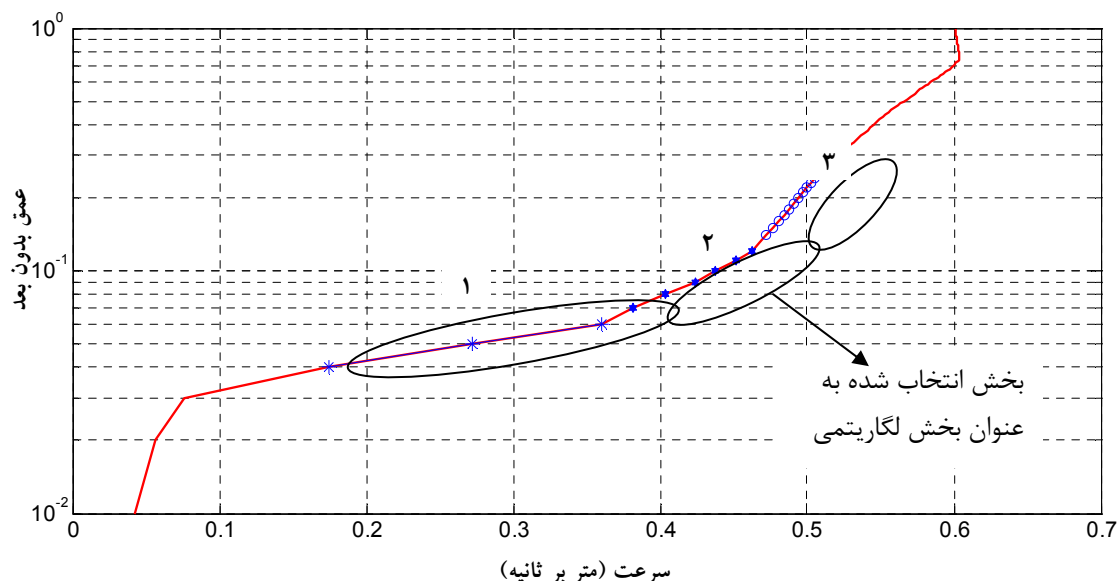
شکل ۸ پروفیل‌های $\overline{u'w'}$ در مقاطع عرضی الف- ۰، ب- ۳۰، پ- ۴۵، ت- ۶۰، ث- ۹۰ و ج- ۱۵۰ درجه

در مقاطع ۶۰، ۹۰ و ۱۵۰ نیز پروفیل‌های تنش‌برشی رینولدز، نظم مشخصی نداشته و تعداد زیادی از آنها به سمت کف کاهش یافته و تعدادی نیز منفی است. به‌هرحال، الگوهای تنش‌های رینولدز در پیچ، نسبت به کانال مستقیم، کاملاً تغییر کرده و به جای اینکه از سطح آب به سمت کف افزایش یابند، نظم مشخصی را نشان نمی‌دهند. روش دیگر تعیین تنش‌برشی بستر، استفاده از پروفیل لگاریتمی است. در جریان یکنواخت کانال‌های مستقیم، پروفیل سرعت طولی در ۲۰ درصد پایینی پروفیل، لگاریتمی بوده و با استفاده از قانون لگاریتمی سرعت می‌توان تنش‌برشی بستر را به‌دست آورد. پاسکال (۲۰۰۴) و باقری (۲۰۰۸) نشان دادند که پروفیل لگاریتمی در کانال مستقیم تنش‌برشی بستر را بیشتر از روش تنش رینولدز نشان می‌دهد. بررسی‌ها در پیچ کانال نشان می‌دهد که پروفیل جریان، یکنواخت‌تر از پروفیل لگاریتمی است. دلیل این امر، وجود جریان ثانویه قوی و باز خورد این جریان با جریان طولی است (شکل ۹). دوریند (۱۹۸۱) و بلانکارت (۲۰۰۲)، بیان کرده‌اند که تغییر و یکنواخت‌تر شدن پروفیل سرعت ناشی از تأثیر

سلول جریان ثانویه بر پروفیل‌های سرعت طولی است. بنابراین با توجه به شکل ۹، پروفیل‌های سرعت از شکل لگاریتمی فاصله می‌گیرند. همچنین، پروفیل‌های سرعت در بخش‌هایی، از جمله در جلوی دیون‌ها می‌توانند سرعت منفی نیز داشته باشند. به‌هرحال، برای تعیین تنش‌برشی بستر از پروفیل لگاریتمی در جریان یکنواخت کانال مستقیم، می‌توان یک بخش لگاریتمی را در ۲۰ درصد پایینی جریان مشاهده کرد، اما در پیچ، بخش لگاریتمی - با توجه به جریان ثانویه قوی و تأثیر آن بر پروفیل سرعت - همیشه در حدود عمق ۲۰ درصدی نبوده و مکان آن در عمق تغییر می‌کند. بنابراین، برای تعیین تنش‌برشی بستر، باید بخش لگاریتمی سرعت را به‌دست آورد. شکل ۱۰ نمونه پروفیل سرعت را در مقطع عرضی ۱۵۰ درجه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نواحی بین ۰/۰۳ تا ۰/۰۶ عمق، بین ۰/۰۶ تا ۰/۱۳ عمق و بین ۰/۱۳ تا ۰/۲۵ عمق، سه خط مستقیم با شیب‌های متفاوت وجود دارد که سرعت‌های برشی متفاوتی را ارائه می‌کنند.



شکل ۹ مقایسه پروفیل‌های سرعت طولی با پروفیل رسم شده به روش لگاریتمی



شکل ۱۰. پروفیل لگاریتمی یکی از پروفیل‌های سرعت

که d_{50} قطر متوسط رسوبها است. سرعت برشی بخش یک شکل ۱۰ برابر 0.18 متر بر ثانیه است، اما سرعت برشی به‌دست آمده از رابطه ۷ در حدود 0.38 متر بر ثانیه است، یعنی سرعت برشی بخش یک، اختلاف بزرگی با سرعت برشی به‌دست آمده از رابطه ۷ دارد و قابل قبول نیست.

در مورد انتخاب سرعت برشی از بین بخش ۲ و بخش ۳، با توجه به نزدیکی سرعت برشی به‌دست آمده از این دو بخش، یکی از آنها را به‌دلخواه در توزیع سرعت برشی مقطع عرضی قرار داده، در نتیجه توزیع سرعت برشی به‌دست آمده باید الگویی شبیه به الگوی توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق داشته باشد. اگر تفاوت این دو الگو زیاد باشد، باید بخش در نظر گرفته شده برای سرعت برشی را تغییر داد. شکل ۱۱ توزیع الگوی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق و توزیع سرعت برشی به‌دست آمده از روش لگاریتمی را نشان می‌دهد.

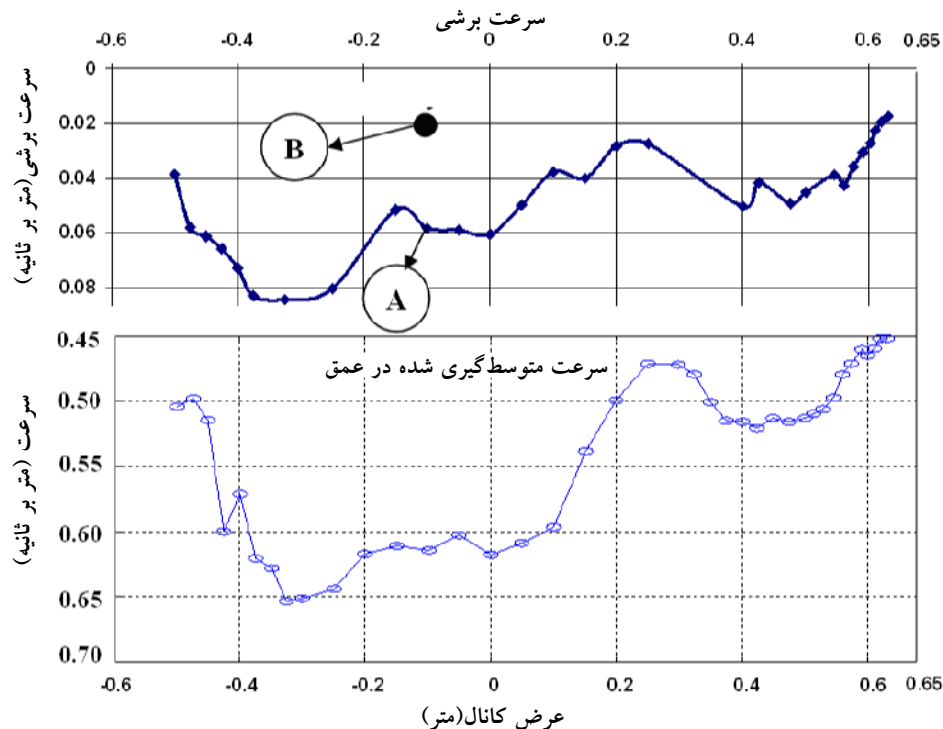
سرعت برشی به‌دست آمده از بخش ۱ برابر 0.18 ، از بخش ۲ برابر 0.58 و از بخش ۳ برابر 0.20 متر بر ثانیه است. دیده می‌شود که سرعت برشی بخش سوم در حدود $\frac{1}{9}$ بخش اول و $\frac{1}{3}$ بخش دوم است. به‌رحال، تعیین این که کدام یک از سرعت‌های برشی به‌دست آمده صحیح است، به بررسی نیاز دارد. برای این کار می‌توان از رابطه سرعت برشی با سرعت استفاده کرد:

$$u_* = (\sqrt{g/C})\bar{u} \quad (7)$$

که در آن رابطه C ضریب شزی متوسط مقطع عرضی و $\bar{u}$ سرعت متوسط‌گیری شده در عمق است. از این رابطه با توجه به ثابت نبودن ضریب شزی نمی‌توان به‌طور مستقیم تنش برشی بستر را برای هر پروفیل به‌دست آورد، اما سرعت برشی به‌دست آمده نباید اختلاف بزرگی با سرعت به‌دست آمده از رابطه ۷ داشته باشد.

ضریب شزی متوسط مقطع عرضی عبارت است از:

$$C = 21.1 \left(R / d_{50} \right)^{1/6} \quad (8)$$



شکل ۱۱ توزیع تنش برشی بستر و سرعت متوسط‌گیری شده در عمق برای مقطع عرضی ۱۵۰ درجه

در این بخش برای مقایسه روش‌های تعیین تنش برشی بستر، چهار روش در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۲، توزیع سرعت برشی به دست آمده با این چهار روش را نشان می‌دهد که عبارتند از:

۱- پروفیل لگاریتمی

۲- روش TKE

۳- تنش برشی رینولدز (روش نقطه‌ای): از تنش برشی رینولدز در یک نقطه نزدیک کف برای تعیین تنش برشی بستر استفاده می‌شود.

۴- تنش برشی رینولدز (روش بیشینه): به جای برونیابی از بخش بیشینه تنش برشی رینولدز تا کف برای تعیین تنش برشی بستر، از بیشینه تنش برشی رینولدز به عنوان تنش برشی بستر استفاده می‌شود.

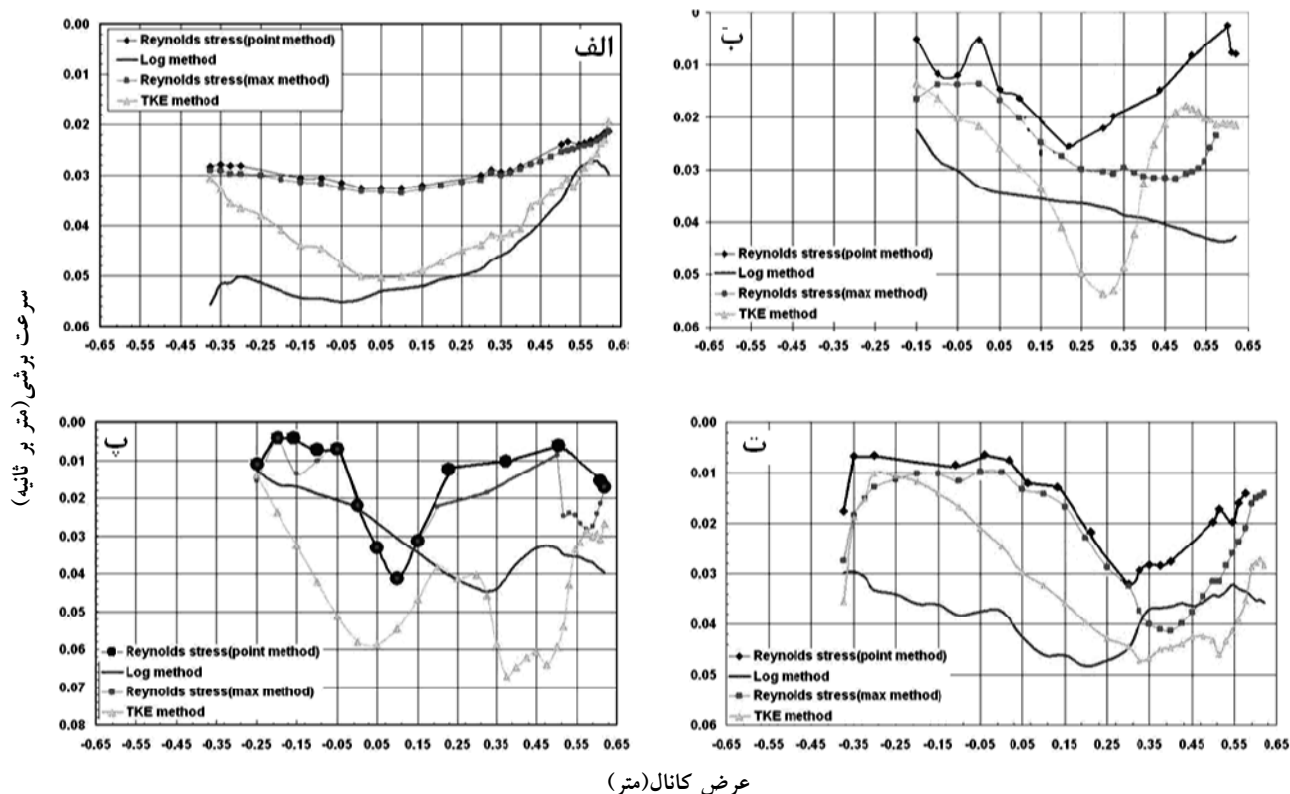
برای استفاده از روش TKE و روش نقطه‌ای تنش رینولدز، از مقادیر تنش رینولدز در ۰/۱۵ عمق جریان از

پروفیل سرعت در شکل ۱۰، در مکان ۰/۱- عرض در شکل ۱۱ قرار دارد. دیده می‌شود که برای رعایت شباهت بین الگوی توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق و توزیع سرعت برشی، مقدار ۰/۵۸ (بخش دوم شکل ۱۰)، به عنوان سرعت برشی انتخاب شده که با نام نقطه A در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نقطه B در شکل ۱۱ نیز سرعت برشی بخش سوم شکل ۱۰ است که انتخاب آن - علاوه بر اینکه سبب می‌شود توزیع سرعت برشی از توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق فاصله بگیرد - اختلاف بزرگی را نیز با سرعت‌های برشی اطراف خود ایجاد می‌کند. در مجموع، با آن که سرعت برشی به دست آمده از رابطه ۷، به سرعت برشی بخش سوم شکل ۱۰ نزدیکتر است، اما انتخاب بخش دوم سبب می‌شود که الگوی سرعت برشی شباهت خود را با الگوی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق حفظ کند.

به دست آمده از روش لگاریتمی را در برابر دیگر روش‌ها در مقطع عرضی صفر درجه نشان می‌دهد. بر طبق این شکل، روش لگاریتمی، سرعت برشی بالاتری را به دست می‌دهد. همچنین مقادیر توزیع تنش برشی بستر به دست آمده از روش TKE به روش لگاریتمی نزدیکتر است.

شکل ۱۲-ب، توزیع سرعت برشی به دست آمده را در مقطع عرضی ۶۰ درجه نشان می‌دهد. برای بخش‌هایی که تنش برشی رینولدز منفی دارند، مقدار $|\overline{u'w'}|$ در نظر گرفته می‌شود. در این شکل ناتوانی روش نقطه‌ای تنش برشی رینولدز در تعیین درست تنش برشی قابل مشاهده است، به طوری که در نزدیکی ساحل خارجی -که بیشترین سرعت طولی وجود دارد (شکل ۱۴-الف)- این روش حداقل مقدار تنش برشی را به دست داده است.

بستر استفاده می‌شود. شکل ۱۲-الف، توزیع سرعت برشی را در مقطع عرضی صفر درجه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که همانند تحقیقات قبلی (پاسکال ۲۰۰۴) و باقری (۲۰۰۸)، سرعت برشی به دست آمده از روش لگاریتمی بیشترین مقدار است. همچنین، در این مقطع، تنش‌های رینولدز دارای الگوی کانال مستقیم بوده و به سمت کف افزایش می‌یابد و در نتیجه توزیع‌های تنش برشی بستر مرتبط با تنش‌های رینولدز نتایجی تقریباً شبیه به توزیع لگاریتمی ارائه می‌دهند. قابل ذکر است که افزایش سرعت برشی از دیواره خارجی به سمت دیواره داخلی، به دلیل افقی نبودن کف در مقطع عرضی صفر درجه و در نتیجه تمایل هسته بیشینه سرعت به سمت دیواره داخلی است. شکل ۱۳-الف، سرعت برشی



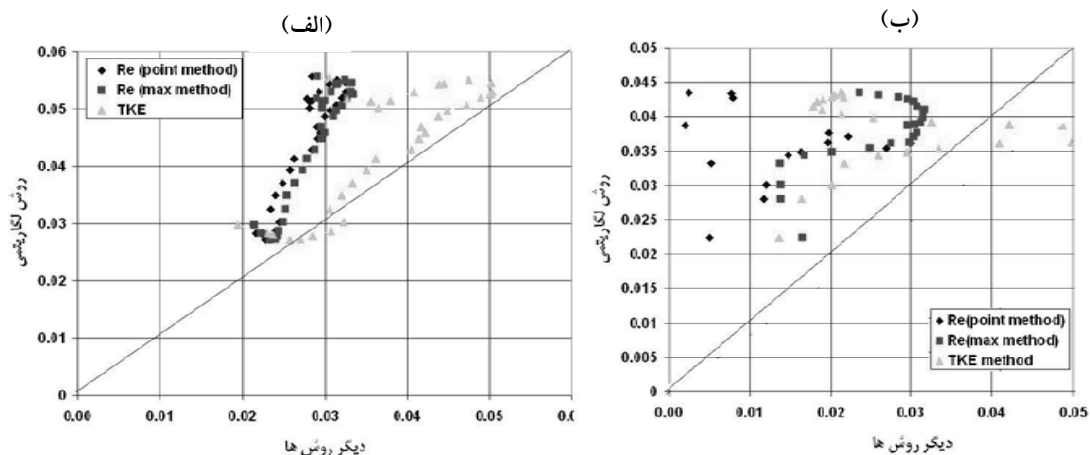
شکل ۱۲ تنش برشی بستر به دست آمده از چهار روش در مقاطع عرضی: الف- صفر درجه، ب- ۶۰ درجه، پ- ۹۰ درجه و ت- ۱۲۰ درجه

درجه را نشان می‌دهد، در $n=+0/3$ هسته بیشینه سرعت در نزدیک کف قرار دارد و بنابراین تنش برشی باید افزایش یابد، در صورتی که شکل ۱۲-پ نشان می‌دهد که تنش برشی به دست آمده از روش‌های وابسته به تنش رینولدز، مقدار کمینه خود را در این مکان ارائه می‌دهد. این نشان‌دهنده ناتوانی روش‌های تنش رینولدز در تعیین درست تنش برشی است.

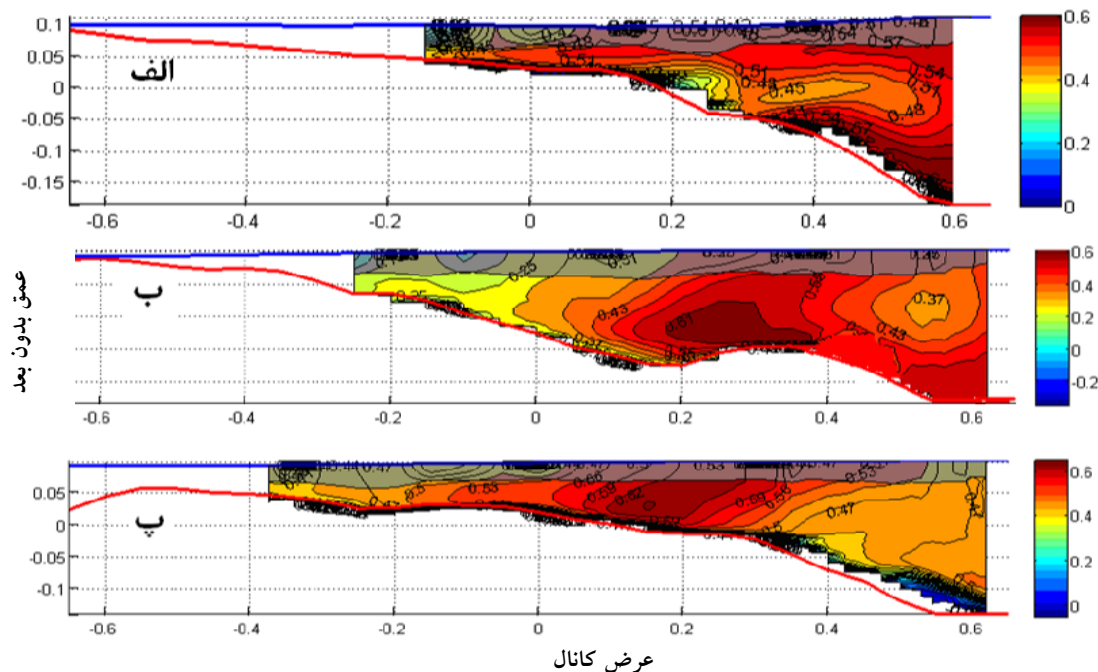
در شکل ۱۲-ت، توزیع‌های تنش برشی بستر به دست آمده، نزدیکی بیشتری به یگدیگر دارند. با وجود این به نظر می‌رسد که تغییر تنش برشی بستر نسبت به تنش‌های رینولدز در بعضی از بخش‌ها قابل توجه نبوده و با الگوی جریان طولی همخوانی نداشته باشد. در شکل ۱۴-پ، بیشینه سرعت در نزدیکی کف در $n=+0/2$ قرار داشته و به سمت ساحل خارجی، سرعت جریان در نزدیکی کف کاهش می‌یابد، در حالی که سرعت برشی به دست آمده از روش TKE و تنش برشی رینولدز برای مقطع عرضی ۱۲۰ درجه، نشان‌دهنده افزایش تنش برشی بستر از مکان $n=+0/2$ تا نزدیکی ساحل خارجی است.

روش‌های نقطه‌ای تنش برشی رینولدز و TKE، توزیع تنش برشی بستر مناسبی را ارائه نمی‌کنند و همچنین الگویی بدون نظم مشخص و متفاوت با روش لگاریتمی و در نتیجه با الگوی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق دارند. الگوی توزیع سرعت برشی باید تا حدودی به الگوی سرعت متوسط‌گیری شده در عمق شباهت داشته باشد. همچنین در روش استفاده از بیشینه تنش برشی رینولدز، ممکن است مقدار بیشینه تنش رینولدز، به جای نزدیک کف در بخش بالایی عمق جریان قرار داشته باشد، که در این صورت، مقدار بیشینه تنش برشی رینولدز نمی‌تواند معرف تنش برشی بستر باشد.

شکل ۱۳-ب مقادیر به دست آمده برای سرعت برشی لگاریتمی را در برابر سه روش دیگر در مقطع عرضی ۶۰ درجه نشان می‌دهد. دیده می‌شود که این مقادیر پراکندگی زیادی نسبت به شکل ۱۳-الف -که در مقطع صفر درجه است- دارند. شکل ۱۲-پ نشان می‌دهد که روش تنش برشی رینولدز و روش TKE توزیع کاملاً متفاوتی را نسبت به روش لگاریتمی به دست می‌دهند. بر طبق شکل ۱۴-ب که توزیع الگوی جریان طولی در مقطع عرضی ۹۰



شکل ۱۳ سرعت برشی به دست آمده از روش لگاریتمی در برابر سه روش دیگر در مقاطع عرضی: الف- صفر درجه و ب- ۶۰ درجه



شکل ۱۴ الگوهای سرعت طولی در مقاطع عرضی الف-۶۰، ب-۹۰ و پ-۱۲۰ درجه

۴- نتیجه گیری

برای بررسی روش‌های تعیین تنش برشی در پیچ، از کانالی با پیچ تند استفاده شد تا مشخصات جریان سه‌بعدی را به خوبی نشان دهد. نتایج به دست آمده نشان داد که الگوی تنش برشی رینولدز بر اثر جریان قدرتمند سه‌بعدی کاملاً تغییر می‌کند و پروفیل‌های تنش برشی رینولدز، هیچ نظم مشخصی را نشان نمی‌دهند. در حالی که به نظر می‌رسد که تنش‌های برشی رینولدز باید به سمت کف و تا نزدیکی آن افزایش یابند، این تنش‌ها، گاهی به سمت کف کاهش و گاهی افزایش می‌یابند. روش TKE -که از تنش‌های نرمال رینولدز استفاده می‌کند- معمولاً الگوی کاملاً متفاوتی را برای توزیع تنش برشی بستر، نسبت به توزیع سرعت متوسط گیری شده در عمق و توزیع تنش برشی بستر به دست آمده از روش لگاریتمی به دست می‌دهد. بنابراین بررسی‌ها، ناممکن بودن تعیین

دقیق تنش برشی بستر با استفاده از روش‌های تنش رینولدز را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، جریان ثانویه قوی، الگوی پروفیل سرعت طولی را از پروفیل لگاریتمی متفاوت می‌سازد، به طوری که پروفیل سرعت طولی در درون پیچ، یکنواخت می‌شد که دلیل آن، تأثیرگذاری سلول مرکزی جریان ثانویه بر پروفیل طولی سرعت است. با وجود آن که پروفیل سرعت از پروفیل لگاریتمی فاصله می‌گیرد، اما می‌توان با یافتن بخش لگاریتمی پروفیل سرعت از آن، در تعیین تنش برشی بستر استفاده کرد. برای تعیین دقیق‌تر توزیع تنش برشی بستر از روش لگاریتمی، می‌توان از شباهت توزیع تنش برشی بستر با توزیع سرعت متوسط‌گیری شده در عمق استفاده کرد. در مجموع، توزیع‌های تنش برشی بستر به دست آمده از روش لگاریتمی نشان می‌دهد که این روش، جواب‌های بهتری را نسبت به روش‌های دیگر مورد بررسی به دست می‌دهد.

Bagherimeyab, F., Albayrak, I., and Lemmin, U. (2008). "Bed shear velocity estimates in rough open channel flow obtained from Acoustic Doppler Velocity Profiler data and direct bed shear stress measurements", The River flow conference, Izmir, Turkey, pp. 151-159.

Blanckaert, K. (2002). "Flow and turbulence in sharp open channel bends", Ph.D. Thesis, Cole Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.

Bridge, J. (1992). "A revised model for water flow, sediment transport, bed topography and grain size sorting in natural river bends", Water Resour. Res., 28(4):999-1013.

Chaudary, U., and Narasimhan, S. (1977). "Flow in 180° open channel rigid boundary bends", J. Hydr. Engr. ASCE, 103(6):651- 657.

De Vriend, H. (1977). "A mathematical model of steady flow in curved shallow channels", IAHR, J. Hydraulic Research, 15(1):37- 54.

De Vriend, H., (1981). "Velocity redistribution in curved rectangular channels", J. Fluid Mech. 107:423-439.

Duarte, A., (2008). "An Experimental Study on Main Flow, Secondary Flow and Turbulence in Open-Channel Bends with Emphasis on their Interaction with the Outer-Bank Geometry", Thesis, École Polytechnique Federale de Lausanne, Switzerland.

Ghosh, S. and Roy, N. (1970). "Boundary shear distribution in open channel flow", Journal of Hydraulic Division., 96(4):967-994.

Johannesson, H. and Parker, G. (1989). "Velocity redistribution in meandering rivers", J. Hydr. Engr. ASCE, 115(8), pp.1019-1039.

Khosronejad, A., Rennie, C., Neyshabouri, S.A.A. and Townsend, R. (2007). "3D numerical modeling of flow and sediment transport in laboratory channel bends", J. Hydr. Engr. ASCE, 133(10), pp. 1123-1134.

Kim, S., Friedrichs, C. and Wright, L. (2000). "Estimating bottom stress in tidal boundary layer from Acoustic Doppler Velocimeter data", J. Hydr. Engr. ASCE, 126(6): 399-406.

Knight, D., Demetriou, J. and Hamed, M. (1984). "Boundary shear in smooth rectangular channels", J. Hydr. Engr. ASCE, 110(4):405- 422.

۵- سپاسگزاری

این تحقیق در دانشگاه EPFL لوزان انجام شده است. بدین‌وسیله از دکتر اشلیس و دکتر بلانکارت برای در اختیار قراردادن ابزار آزمایشگاهی و همچنین از قطب علمی ارزیابی و بهسازی شبکه‌های آبیاری و زهکشی بخاطر کمک‌های مالی‌شان تشکر و قدردانی می‌شود.

۶- فهرست علائم

B	عرض کانال
C	ضریب شزی
C_d	ضریب دراگ
g	شتاب ثقل
H	عمق متوسط جریان
Q	بده
R	شعاع هیدرولیکی مقطع کانال
R_c	شعاع انحناء خط مرکزی کانال
R_e	عدد رینولدز
S_f	شیب انرژی
U	سرعت متوسط
u	سرعت در ارتفاع Z
u_*	سرعت برشی
u'	نوسانات سرعت طولی
w'	نوسانات سرعت عمودی
Z	ارتفاع بالای کف
Z_0	مشخصه طول زبری
τ_0	تنش برشی کل
ρ	چگالی آب
$\overline{u'w'}$	تنش برشی رینولدز

۷- منابع

منصوری، ا.، (۱۳۸۵). «شبیه‌سازی سه‌بعدی تغییرات بستر در قوس ۱۸۰°»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

- Thomson, W. (1876). "On the origin of windings of rivers in alluvial plains, with remarks on the flow of water round bends in pipes", *Proc. Royal Soc. London*, 25, pp. 5–8.
- Van Balen, W., Blanckaert, K. and Uijttewaalt, W. S. J. (2010). "Analysis of the role of turbulence in curved open-channel flow at different water depths by means of experiments, LES and RANS", *Journal of Turbulence*, 11(12), pp. 1-19.
- Wu, W., Rodi, and Wenka, T. (2000). "3D numerical modeling of flow and sediment transport in open channels", *J. Hydr. Engr. ASCE*, 126(1), pp. 4–15.
- Zarrati, A. and Karimpour, S. (2004). "Semianalytical model for shear stress distribution in simple and compound open channels", *J. of Hyd. Eng.* 134(2):205-215.
- Zeng, J., Constantinescu, S.G. and Weber, L. (2008). "A 3D non-hydrostatic model to predict flow and sediment transport in loose bed channel bends", *J. Hyd. Res.*, 46(3), pp. 356– 372.
- Zimmerman, C. (1977). "Roughness effect on the flow direction near curved stream beds", *J. of Hydraulic Research*, 15(1):73– 84.
- Mohammadi, M. and Knight, D. (2004). "Boundary shear stress distribution in a V-shaped channel", *Hydraulics of Dams and River Structures*, Taylor & Francis Group, London.
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). "Turbulence in Open Channel Flows", *Balkema*, Rotterdam, The Netherlands.
- Odgaard, A. and Bergs, M. (1988). "Flow processes in a curved alluvial channel", *Water Resour. Res.*, 24(1), pp. 45–56.
- Pascale, M., Robson, C. and Lapointe, M. (2004). "Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields", *Earth Surf. Process. Landforms* 29(11):1403–1415.
- Rozovskii, I.L. (1957). "Flow of water in bends of open channels", *Academy of Sciences of the Ukrainian SSR*, Kiev.
- Ruther, N., and Olsen, N. R. (2005). "3D modeling of sediment transport in a narrow 90° channel bend", *J. Hydr. Engr. ASCE*, 131(10), pp. 917–920.
- Schlichting, H. (1987). "Boundary Layer Theory", *McGraw-Hill*: New York.